

## Curva de resistência ao fogo de projeto para pilares de aço birrotulados e sem proteção

Antônio Maria Claret de Gouveia

*Professor Adjunto, D.Sc, Departamento de Engenharia de Controle e Automação, Escola de Minas, UFOP  
E-mail: claret@em.ufop.br*

Welber M. Carvalho

*Mestrando em Engenharia Civil, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Minas, UFOP*

### Resumo

Neste trabalho, conceitua-se a curva de resistência ao fogo de projeto de um dado pilar de aço como meio alternativo para a elaboração de projetos estruturais em situação de incêndio via Método dos Elementos Finitos. A metodologia empregada na elaboração da curva de resistência ao fogo de projeto é discutida. O caso de determinação da curva para um pilar dado é descrito como ilustração da metodologia proposta.

**Palavras-chave:** Resistência ao fogo de pilares de aço; Método dos Elementos Finitos; Curva de resistência ao fogo de projeto.

### Abstract

*In this work, a steel-column-design fire resistance curve concept is presented and proposed as an important data to design steel structures in fire using Finite Element Method. The method used to establish a design fire resistance curve for a given profile is described. A complete example of the determination of this project fire resistance curve is given.*

**Keywords:** *Steel columns fire resistance; Finite Element Method; Design fire resistance curve.*

# 1. Introdução

Apesar da grande variedade dos perfis produzidos pela indústria, as rotinas de cálculo e de dimensionamento dos escritórios de projeto estrutural sempre conduzem ao uso de perfis que se situam em uma determinada faixa de dimensões para estruturas de porte semelhante. Essa relativa padronização se compreende em função da especialização dos construtores em determinados tipos de edificações, o que se verifica na prática. Em consequência, há um tipo de estudo que tem o mesmo objetivo das investigações paramétricas, embora empregue processo metodológico distinto, o qual estudo se refere à obtenção de curvas de resistência ao fogo para pilares de aço com dimensões e condições de contorno típicas das usuais na prática de projeto. Nesse trabalho, são apresentadas curvas de resistência ao fogo de um pilar de aço birrotulado com o objetivo de ilustrar a aplicabilidade desse tipo de investigação. O perfil foi escolhido entre os padronizados pela ABNT com as dimensões que se supõem representativas dos perfis usuais na construção de edifícios de andares múltiplos.

As curvas de resistência têm uma finalidade dupla na prática da Engenharia de Incêndio. Em primeiro lugar, de um ponto de vista mais imediato, servem para ilustrar o tipo de investigação que se pode fazer especificamente para uma determinada linha de produtos disponíveis no mercado. Nesse caso, as curvas de resistência são um tipo de informação do fabricante que, naturalmente, implementam a competitividade do produto. Em segundo lugar, de um ponto de vista de investigação tecnológica, tais curvas indicam padrões de comportamento de uma dada classe de perfis, o que pode suscitar pesquisas futuras.

## 2. Processo metodológico

Em situação de incêndio, os pilares de aço birrotulados podem, especialmente, chegar prematuramente a uma condição de colapso. De fato, sendo birrotulados, têm um comprimento de flambagem igual a seu comprimento geométrico,

o que reduz a tensão de flambagem na proporção do seu quadrado. Qualitativamente, o fenômeno de instabilidade global em situação de incêndio poderia ser descrito em duas fases, a saber: (a) temperaturas no perfil inferiores a 400°C; (b) temperaturas no perfil superiores a 400°C.

Na primeira fase, não se observa uma redução significativa da rigidez da barra, ao mesmo tempo em que se verifica sua dilação linear; a tensão de flambagem é aproximadamente igual à tensão de flambagem à temperatura ambiente. Nessa fase, observa-se uma redução do esforço resultante de compressão na peça, em função da dilatação, o que reduz a tensão atuante e eleva a resistência ao fogo. Na segunda fase, porém, a redução do módulo de elasticidade longitudinal é bastante acentuada e a tensão de flambagem se reduz proporcionalmente. Admite-se uma redução da carga atuante em função do caráter excepcional da solicitação, mas, ainda assim, a instabilidade dos pilares é uma situação crítica de verificação de uma estrutura em incêndio.

Os processos simplificados de cálculo de pilares, adotados em normas estrangeiras como a BS 5950: Part 8 e na norma brasileira NBR 14323, empregam hipóteses analíticas simplificadoras como a de solicitação axial e distribuição uniforme de temperaturas. Para levar em conta fatores como a existência de tensões residuais, excentricidade accidental da carga e imperfeição geométrica da barra, as normas de cálculo utilizam curvas de flambagem elaboradas com base em programas experimentais que complementam os resultados da formulação analítica. De acordo com essa metodologia, o ECCS (1985) recomenda as temperaturas críticas de pilares de aço indicadas na Tabela 1, em função da razão da carga solicitante na situação de incêndio para a carga solicitante à temperatura ambiente.

Observa-se, na Tabela 1, que as temperaturas críticas são baixas, mesmo para razões de carga reduzidas. Isto é consequência das hipóteses simplificadoras adotadas na análise, notadamente a hipótese da distribuição uniforme de temperaturas na seção e ao longo do comprimento da barra. Em consequência, o custo de proteção passiva envolvido no projeto de resistência ao fogo de pilares de aço é habitualmente muito elevado (Claret, 2000).

As análises conduzidas pelo Método de Elementos Finitos simulam condições mais próximas da situação real de emprego dos pilares de aço nas edificações. Por exemplo, raramente uma barra estará envolvida pelo fogo idênticamente nas quatro faces. Ora, a existência de gradientes de temperatura na seção transversal resulta na transferência de carga das partes mais aquecidas para as partes mais frias, podendo elevar significativamente a resistência ao fogo da barra. Por outro lado, a análise de pilares de aço pelo Método de Elementos Finitos, conforme a implementação do VULCAN (Bailey, 1994), permite a consideração de tensões superiores ao limite elástico do material; em paralelo, grandes deslocamentos também podem ser considerados. Por outro lado, com mais acuidade e menor custo que nas experimentações, condições de contorno e de carregamento variadas podem ser introduzidas na análise (Burgess & Plank, 1999). Desse modo, as análises pelo VULCAN são um método que permite ao engenheiro de cálculo aproximar-se, tanto quanto possível, da resistência ao fogo do pilar, sem desprezar parâmetros de grande importância na sua resistência ao fogo, como a hiperestaticidade e a distribuição não-uniforme de temperaturas.

O processo metodológico empregado nesse trabalho consiste no uso de análises extensivas através do VULCAN de pilares de aço com geometria, carregamento e condições de contorno repre-

**Tabela 1** - Temperaturas críticas para pilares de aço em função da razão de carga.

Razão de carga	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
Temp. Crít. (°C)	585	540	490	430	360

sentativas da prática de projetos no ramo das edificações residenciais e comerciais de múltiplos andares. As curvas de resistência são elaboradas para diversas situações com a intenção de que sejam aplicáveis em projetos reais. Ademais, o exame dessas curvas de resistência permite concluir sobre o comportamento de pilares de aço em incêndio, particularizando conclusões gerais que também podem ser úteis em projeto.

### 3. Curvas de resistência

De acordo com o processo metodológico proposto, pilares de aço, birrotulados e sem proteção passiva, submetidos a um diagrama de momentos fletores retangular, foram analisados pelo VULCAN, na situação de carregamento mostrada na Figura 1(a). Os comprimentos de flambagem de 2, 4, 6 e 8 m foram adotados, admitindo-se a interpolação linear para valores situados nesses intervalos (Schleich, 1985). O carregamento aplicado é calculado de acordo com os anexos D, E, H e I da NBR 8800 para os dois tipos de pilares analisados, impondo-se relações de excentricidade acidental  $e_a/b$  de 0, 0,1, 0,25, 0,5 e 1,0, onde  $e_a$  é a excentricidade acidental e  $b$ , a altura total do perfil. A excentricidade total se obtém acrescentando uma imperfeição geométrica de  $L/1000$  a  $e_a$ , onde  $L$  é o comprimento total do pilar. Para cada excentricidade, frações da carga axial crítica são aplicadas, juntamente com os momentos correspondentes. Evidentemente, quanto menor a fração do carregamento crítico aplicada, maior a reserva de resistência ao fogo.

As Figuras 2 e 3 são as curvas de resistência para pilares de aço de comprimento 4m e 8m, respectivamente, formados com um perfil CVS 450x216. Qualitativamente, as seguintes observações são feitas quanto ao comportamento dos pilares examinados:

- (a) Verifica-se a existência de duas resistências ao fogo características, a saber: um valor mínimo, correspondente à carga axial máxima, e um valor intermediário, correspondente à razão de carga 0,3.

- (b) A resistência ao fogo tende a ter valores relativamente elevados (acima de 60 minutos) para razões de carga muito baixas (menores que 0,3).
- (c) Na medida em que o comprimento de flambagem cresce, a carga axial máxima decresce para relações  $e_a/b$  crescentes no intervalo [0,1].
- (d) A diferença entre as cargas axiais máximas entre duas dadas relações  $e_a/b$  decresce na medida em que os comprimentos de flambagem crescem.

Observa-se que todas as curvas têm dois trechos definidos, conforme se ilustra na Figura 4, em função da razão de carga.  $t_1$  é a resistência ao fogo, que corresponde à carga axial máxima e, portanto, à razão de carga 1,0;  $t_2$  é a resistência ao fogo, que corresponde à razão de carga 0,3;  $t_3$  é a resistência ao fogo mínima que corresponde à razão de carga 0,1. Desse modo, uma “curva de resistência ao fogo de projeto” para um dado perfil pode ser traçada com o aspecto da curva da Figura 4. Evidentemente, com o objetivo de se utilizarem coeficientes de segurança adequados, tais coeficientes

devem ser inclusos na sua elaboração. Por isso, para a maior razão de carga, adota-se o valor mínimo de  $t_1$ ; para a razão de carga 0,3, toma-se o valor médio de  $t_2$  e, para a razão de carga 0,1, toma-se o valor mínimo de  $t_3$ . Nesse último caso, o valor mínimo é considerado, apesar de ser a carga axial muito pequena, para limitar a deformação da barra.

A Tabela 2 lista os valores de  $t_1$ ,  $t_2$  e  $t_3$  para os diversos comprimentos da barra e as diversas relações  $e_a/b$  do perfil CVS 450x216. As seguintes conclusões permitem traçar uma curva de resistência ao fogo de projeto para esse perfil:

- (a) O tempo  $t_1$  é no mínimo igual a 18 min, independentemente do comprimento da barra e da relação  $e_a/b$ .
- (b) Para a relação  $e_a/b = 0$ , o tempo  $t_2$  varia muito com o comprimento da barra, caracterizando curvas distintas para cada um dos pilares.
- (c) Para  $0 < e_a/b \leq 1,0$ , o tempo  $t_2$  é no mínimo igual a 27 min.
- (d) O trecho (II) das curvas de resistência do perfil considerado é caracteri-

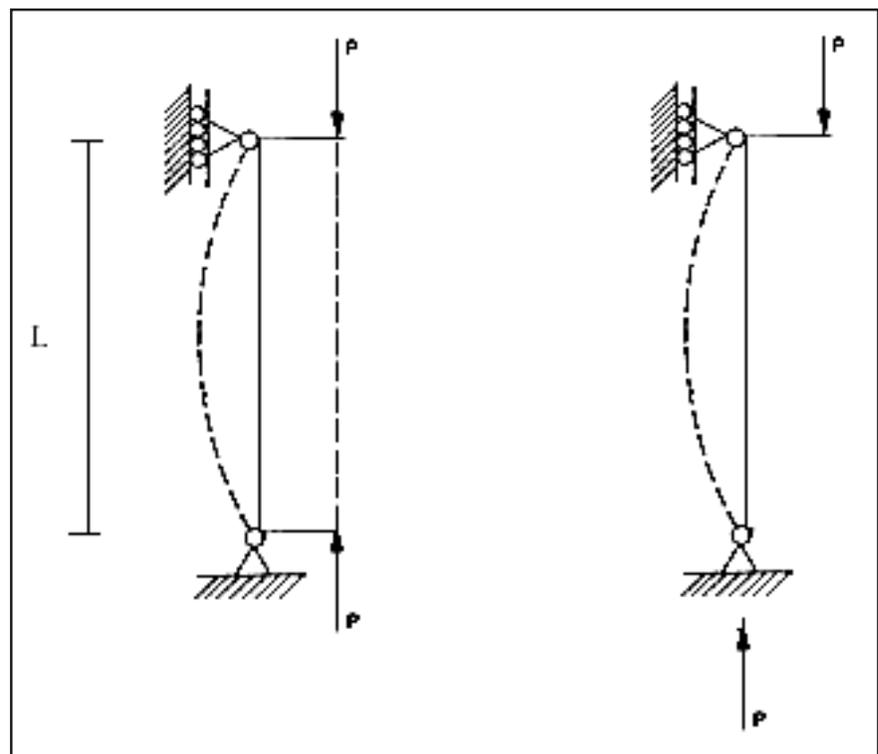
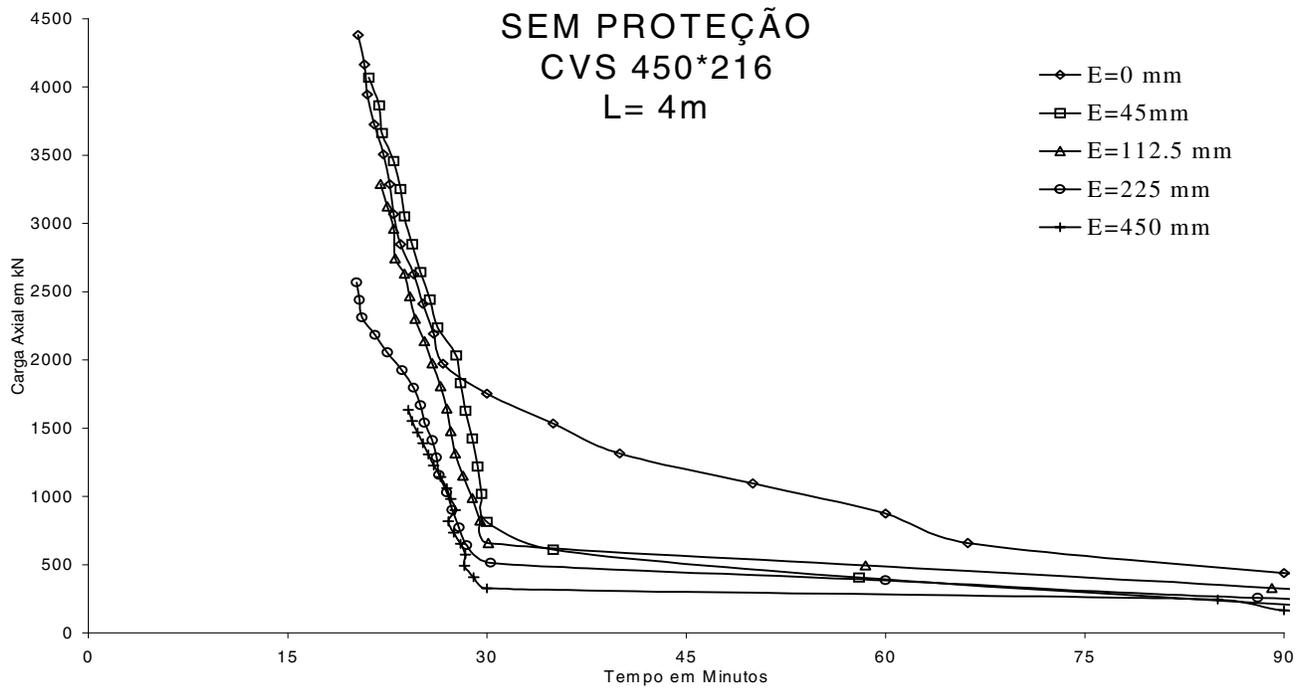
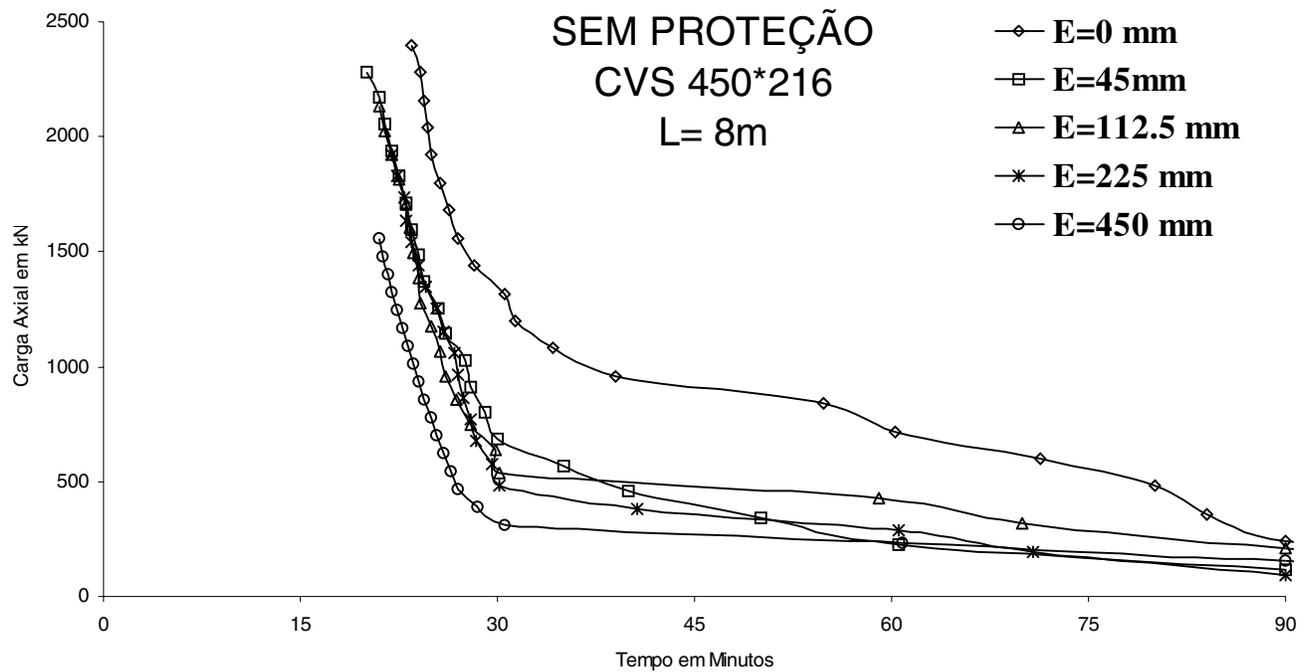


Figura 1 - Tipos de pilares analisados.



**Figura 2** - Resistência ao fogo do perfil CVS 450\*216, birrotulado.



**Figura 3** - Resistência ao fogo do perfil CVS 450\*216, birrotulado, sem proteção.

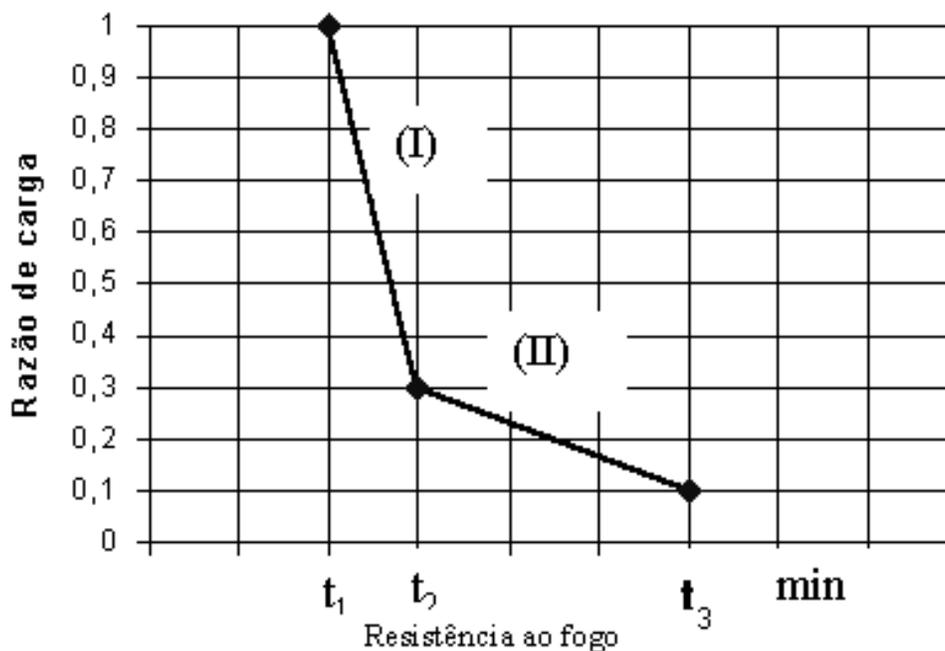


Figura 4 - Curva de resistência ao fogo de projeto.

Tabela 2 - Pontos notáveis das curvas de resistência ao fogo de projeto para o perfil CVS 450 x 216.

zado por um valor mínimo de  $t_3$  igual a 60 min.

(e) O tempo  $t_2$  varia de acordo com a relação  $e_a/b$ , mantendo-se, na média, independente do comprimento da barra. Os valores médios de  $t_2$  em função de  $e_a/b$  são dados na Tabela 3.

Portanto, a curva de resistência ao fogo de projeto para o perfil CVS 450\*216 é a mostrada na Figura 5.

## 4. Conclusões

A curva de resistência ao fogo de projeto pode ser traçada para um determinado perfil, viabilizando a aplicação simples e direta, no ambiente do escritório de projeto, de resultados do Método de Elementos Finitos, formulado para a análise de estruturas de aço em situação de incêndio. A adoção de coeficientes de segurança sobre os valores dos tempos de resistência ao fogo pode ser feita no nível dos escritórios de projeto que podem dispor de curvas específicas para os perfis mais utilizados.

L (m)	$e_a/b$	$t_1$ (min)	$t_2$ (min)	$t_3$ (min)
2	0,00	20	33	91
	0,10	18	27	60
	0,25	20	28	90
	0,50	20	28	91
	1,00	19	27	90
4	0,00	20	40	90
	0,10	21	29	60
	0,25	22	29	89
	0,50	20	28	88
	1,00	24	29	90
6	0,00	21	54	90
	0,10	20	29	61
	0,25	18	27	89
	0,50	20	29	88
	1,00	18	27	89
8	0,00	34	60	90
	0,10	20	30	61
	0,25	21	30	90
	0,50	22	30	71
	1,00	21	27	90

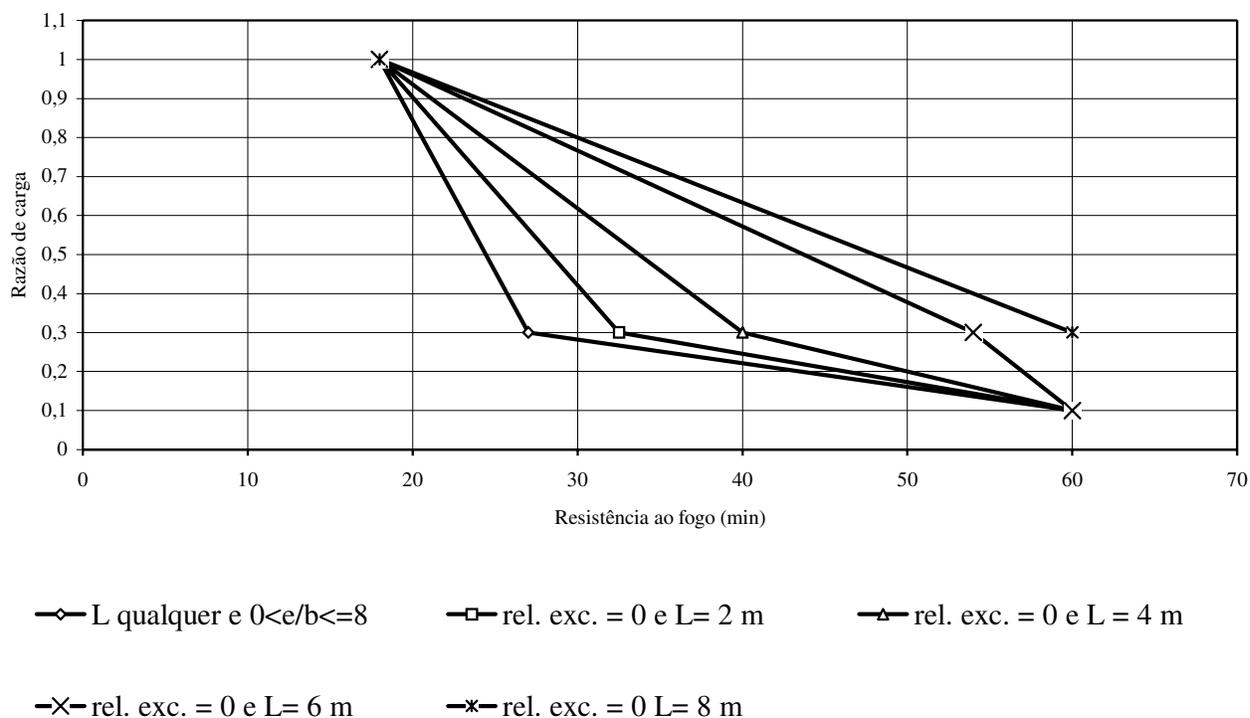


Figura 5 - Curva de resistência ao fogo de projeto para o perfil CVS 450 x 216 sem proteção.

Tabela 3 - Valores médio, mínimo e máximo de  $t_2$  para o perfil CVS 450\*216.

$e_a/b$	$t_2$ médio (min)	$t_2$ mínimo (min)	$t_2$ máximo (min)
0,00	46	33	60
0,10	28	27	30
0,25	29	27	30
0,50	29	28	30
1,00	28	27	29

## Referências Bibliográficas

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14323: *Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio - Procedimento*. Rio de Janeiro, 1999.
- BAILEY, C. G. *Simulation of the structural behaviour of steel-framed buildings in fire*. Sheffield: Department of Civil and Structural Engineering, University of Sheffield, 1995. 247f. (Ph.D Thesis).
- BURGESS, I. W., PLANK, R. J. Steel frame analysis in fire. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL "O USO DE ESTRUTURAS METÁLICAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL", 2., 1999, Belo Horizonte. *Anais... [CD-ROM]*. Belo Horizonte: Sociedade Mineira de Engenheiros/AMICEM, 1999. 44f.
- CLARET, A. M. *Resistência ao fogo de estruturas: alternativas técnicas para a redução do custo da proteção passiva*. 2000. 37f. Relatório Interno L01/2000. Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, UFOP.
- SCHLEICH, J. *Fire resistance of steel columns*. Research Report of ARBED Research Project REFAO. 1985. 257f.

Artigo recebido em 20/08/2002 e aprovado em 05/01/2003.



[www.rem.com.br](http://www.rem.com.br)  
[www.scielo.br](http://www.scielo.br)